

PENYISIHAN PO_4 DALAM AIR LIMBAH RUMAH SAKIT UNTUK PRODUKSI PUPUK STRUVITE

Eko Ariyanto^{1*}, Ani Melani², Tri Anggraini³

¹²³ Program Studi Teknik Kimia Universitas Muhammadiyah Palembang

Jln. Jend. A. Yani 13 Ulu Palembang

*eko.ariyanto@umpalembang.ac.id

ABSTRAK

Keberadaan PO_4 dan NH_4 dalam air limbah dapat menimbulkan permasalahan terhadap lingkungan. Teknologi kristalisasi struvite ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) adalah proses reaksi yang memanfaatkan ion PO_4 dan NH_4 dalam air limbah. Struvite adalah kristal putih yang terdiri dari magnesium, amonium dan fosfor dalam konsentrasi yang sama ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Pada makalah ini mempelajari pembentukan struvite crystal dengan berbagai variabel yaitu pH larutan dan perbandingan reaktan $\text{Mg}:\text{PO}_4$ serta kinetika reaksi kristalisasi yang berlangsung di aeration column crystalizer. Pada perbandingan molar $\text{Mg}:\text{PO}_4$ 1:1 penyisihan PO_4 maksimum adalah 83,7% pada pH 9. Penyisihan PO_4 meningkat dengan meningkatnya perbandingan molar reaktan $\text{Mg}:\text{PO}_4$, dan mencapai penyisihan optimum 88,1 % pada $\text{Mg}:\text{PO}_4$ 3:1. Studi kinetika reaksi kristalisasi struvite pada pH 9 dan perbandingan molar reaktan $\text{Mg}:\text{PO}_4$ pada ratio 3:1 dengan menggunakan *aeration column crystallizer* menghasilkan penyisihan PO_4 83%. Kinetika reaksi pembentukan struvite kristal memberikan korelasi terbaik pada kinetika pseudo first orde dengan konstanta laju reaksi $0,05 \text{ min}^{-1}$. Produk struvite Kristal kering dianalisa menggunakan SEM, EDS dan XRD.

Kata kunci: Struvit, Kristalisasi, kinetikareaksi

ABSTRACT

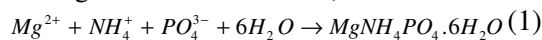
The presence PO_4 and NH_4 in hospital wastewater can cause problems to the environment. Struvite ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) crystallization is a reaction process of PO_4 and NH_4 ion in wastewater with Mg ion reactant. Struvite is a white crystal composed of magnesium, ammonium and phosphorus in the stoichiometric ratio of $\text{Mg}:\text{PO}_4:\text{Mg}$ of 1:1:1. The main objective of this paper is to study the formation of struvite crystals with different variables solution pH and reactant ratio of $\text{Mg}:\text{PO}_4$ and crystallization kinetics of reactions that take place in aeration column Crystalizer. When at 1:1 stoichiometric ratio of $\text{Mg}:\text{PO}_4$, 83.7% of PO_4 was recovered at pH 9. Removal efficiency of PO_4 increased with increasing molar ratio $\text{Mg}:\text{PO}_4$, and it reached 88.1% at molar ratio $\text{Mg}:\text{PO}_4$ of 3: 1. Struvite crystallization kinetics was conducted in aeration column crystallizer produces at pH 9 and molar ratio of $\text{Mg}:\text{PO}_4$ of 3: 1. Recovery of PO_4 resulted 83%. Reaction kinetics of struvite formation results were in agreement with a pseudo first-order kinetics and reaction rate constant was 0.05 min^{-1} . Struvite crystals product was analyzed using SEM, EDS and XRD

Key words: Struvite; Crystallization; reaction kinetic

PENDAHULUAN

Kandungan fosfat (PO_4^{3-}) dalam air limbah menimbulkan permasalahan terhadap kualitas limbah tersebut, misalnya terjadinya eutrofikasi. Eutrofikasi merupakan masalah lingkungan hidup yang diakibatkan oleh limbah fosfat, selain itu juga terdapat NH_4 . Untuk mengurangi dampak penurunan kualitas air yang disebabkan oleh PO_4 dan NH_4 maka dibutuhkan suatu metode untuk memanfaatkan ion PO_4 dan NH_4 untuk dijadikan struvite ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) kristal. Salah satu metoda yang tengah dikembangkan adalah memanfaatkan kemampuan fosfat dan NH_4 untuk membentuk kristal dengan penambahan reaktan Mg (Ohlinger dkk, 1999).

Struvite adalah kristal putih secara kimia dikenal sebagai magnesium amonium fosfor hexahydrate ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Proses pembentukan struvite adalah dengan mereaksikan Mg^{2+} , NH_4^+ dan PO_4^{3-} sesuai dengan reaksi umum yang ditunjukkan dalam Pers. (1). Reaksi pembentukan struvite kristal terjadi apabila konsentrasi magnesium, amonium dan fosfor dalam larutan melebihi *solubility product* (K_{SP}) (Ariyanto dkk, 2014, Ohlinger dan Schroeder, 1998).



Pembentukan struvite kristal pada proses pengolahan air limbah tidak diinginkan, karena dapat membentuk deposit pada aliran pipa. Pembentukan struvite kristal tersebut dapat mengganggu proses aliran sehingga dapat meningkatkan biaya produksi. Beberapa alat yang dapat terganggu karena proses pembentukan struvite seperti pompa, alat pertukaran panas, dan kompresor.

Beberapa teknologi yang telah dikembangkan untuk mengurangi pencemaran yang diakibatkan oleh fosfor adalah dengan proses adsorpsi dan membran, tetapi pada proses tersebut membutuhkan biaya yang tinggi. Teknologi yang murah dan memiliki nilai ekonomis adalah proses kristalisasi. Teknologi pengolahan limbah dengan cara kristalisasi tidak hanya dapat mengurangi kandungan fosfor, amonium dan magnesium pada air limbah tetapi juga dapat mengubahnya menjadi pupuk padatan yang memiliki nilai ekonomis tinggi dan dapat digunakan untuk tanaman.

pH larutan adalah parameter yang paling penting pada proses kristalisasi struvite. Peningkatan pH larutan dari 8 sampai 10 dapat

meningkatkan penyisihan fosfor 80 - 90 %. Pembentukan struvite tersebut terjadi jika *Ion Activity Product* (IAP) dari Mg^{2+} , NH_4^+ , dan PO_4^{3-} lebih besar dari *Solubility Product* (K_{SP}) (Ariyanto, E., et al., 2013). Nilai IAP dikontrol oleh pH larutan. Sehingga peningkatan pH akan meningkatkan nilai IAP larutan dengan konsentrasi yang sama. Nelson et al. (2003) dan Ariyanto et al. (2014), mempelajari pengaruh pH pada kristalisasi struvite. Mereka melaporkan bahwa konstanta laju pertumbuhan Kristal mengikuti model kinetika orde pertama yang hasilkan peningkatan laju pembentukan struvite dengan meningkatnya pH larutan dari 8,4 - 9,0. Shalaby, M.S. dan El-Rafie, Sh. (2015), mempelajari proses pembentukan struvite Kristal menggunakan batch reactor dengan mengamati pengaruh proses parameter antara lain variasi rasio $\text{Mg}:\text{PO}_4$, tingkat kejenuhan larutan dan pH larutan. Hasilnya menunjukkan bahwa rasio $\text{Mg}:\text{PO}_4$, tingkat kejenuhan larutan dan pH larutan mempengaruhi kinetika pembentukan struvite dan efisiensi *removal* fosfor mencapai 93%.

Proses kristalisasi yang umum digunakan untuk *recovery* fosfor adalah reactor unggun terfluidisasi (Bhuiyan dkk., 2008). Tetapi kristalisasi menggunakan reactor unggun terfluidisasi memiliki kekurangan antara lain *seed crystal* yang digunakan dapat mengurangi kemurnian produk dan meningkatkan biaya operasional. Proses kristalisasi menggunakan reactor berpengaduk juga tidak menguntungkan karena struvite Kristal dapat melekat pada pengaduknya. Sehingga penelitian ini diusulkan proses kristalisasi menggunakan *Aeration Column Crystallizer*.

Pada makalah ini mempelajari secara detail proses pembentukan struvite crystal dengan berbagai variabel yaitu pH larutan dan perbandingan reaktan $\text{Mg}:\text{PO}_4$ serta kinetika reaksi kristalisasi yang berlangsung di *aeration column crystallizer*.

METODE

Bahan Penelitian

Air limbah yang digunakan adalah berasal dari rumah sakit yang telah disaring untuk menghilangkan kotoran. Larutan NaOH yang digunakan sebagai pengaturan nilai pH. Larutan $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ digunakan sebagai sumber reaktan ion Mg^{2+} yang akan

direaksikan dengan limbah yang mengandung fosfat dan ammonium.

Metodelogi

Pengaruh pH dan Ratio Reaktan Mg:PO₄

Air limbah yang berasal dari rumah sakit ditampung dan disaring kemudian dimasukkan ke dalam erlenmeyer sebanyak 100 ml. Kemudian air limbah ditambahkan larutan NaOH sebagai pengatur pH air limbah yang diinginkan pada pH 7, 8, 9, 10 dan 11. Selanjutnya ditambahkan larutan reaktan MgCl₂·6H₂O pada konsentrasi tertentu. Larutan tersebut diaduk menggunakan shaker batch dengan kecepatan pengadukan 120 rpm dalam waktu 60 menit. Setelah mencapai waktu yang diinginkan kemudian sampel disaring menggunakan kertas saring membran 0,2 µm dan filtratnya dianalisa PO₄.

Laju Kinetika Pembentukan Struvite

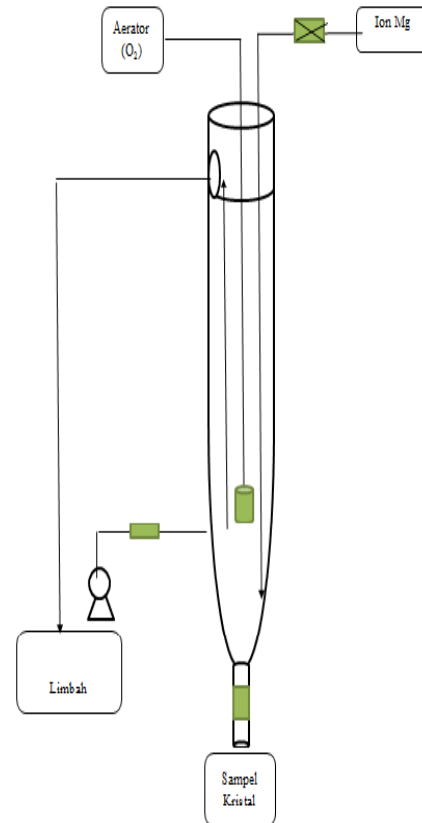
Kristal pada Aeration Column Crystallizer

Air limbah yang berasal dari rumah sakit ditampung di dalam bak penampung limbah dan larutan reaktan ditempatkan pada bak penampung reaktan. Dari bak tersebut dialirkan menuju influen *crystallizer* yang terletak di bagian bawah. Selanjutnya air mengalir dengan arah aliran dari bawah dan ke atas (up flow). Secara detail peralatan dapat dilihat pada Gambar (1). Bercampurnya larutan limbah dan reaktan ion Mg pada aliran proses aerasi akan menghasilkan kristal struvite yang mengendap di bagian bawah *crystallizer*. Air limpasan menuju ke efluen yang berada di bagian atas *crystallizer*. Dengan melakukan pemeriksaan kadar fosfat dilakukan pada sampel yang diambil di efluen *crystallizer* dengan rentang waktu tertentu. Perhitungan efisiensi penyisihan fosfat akibat proses kristalisasi dilakukan pada pH 9 dan ratio Mg:PO₄ 3:1 dengan menggunakan persamaan di bawah ini (Battiston dkk, 2001)

$$E = \frac{[PO_4]_{in} - [PO_4]_{out}}{[PO_4]_{in}} \cdot 100\%$$

(1)

Setelah pada waktu tertentu struvite yang terbentuk dianalisa menggunakan SEM, EDS dan XRD

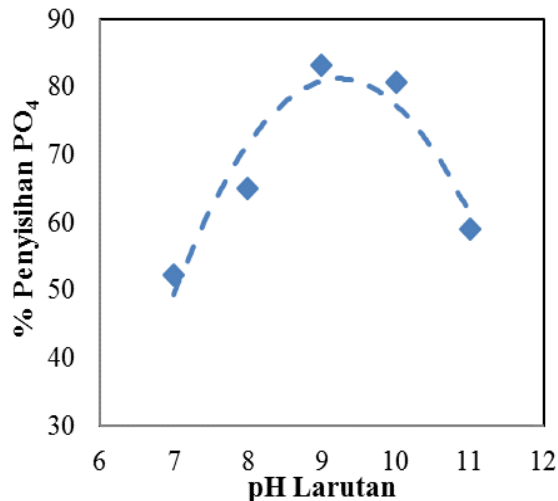


Gambar 1. Aeration Column Crystallizer

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh pH terhadap Persentase Penyisihan PO₄

Pengaruh pH larutan merupakan salah satu faktor yang paling penting untuk proses reaksi pembentukan struvite kristal. Peningkatan penyisihan PO₄ pada air limbah dipengaruhi oleh pH larutan dan lebih lanjut mempengaruhi pembentukan anstruvite, semakin meningkatnya pH larutan maka semakin banyaknya endapan kristal yang akan terbentuk (Pastor dkk, 2008). Efisiensi penyisihan PO₄ pada variasi pH larutan dapat dilihat pada Gambar 2. Pada Gambar 2 menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan PO₄ sangat dipengaruhi oleh pH larutan, dan efisiensi mencapai nilai maksimum pada pH 9. Efisiensi penyisihan PO₄ pada penelitian ini meningkat dari 52.36% sampai 83.6% dengan meningkatnya pH larutan dari 7 ke 9, dan efisiensi penyisihan PO₄ terbaik diamati pada pH 9 dengan hasil efisiensi penyisihan PO₄ sebesar 84%.



Gambar 2. Pengaruh pH terhadap penyisihan PO₄.

Hasil pengamatan pada Gambar 2 ini menunjukkan bahwa nilai pH berada di kisaran 9 dan 10. Hasil yang sama juga didapatkan pada penelitiannya (Wang dkk, 2006; Li dkk, 2003). Menurut Battistoni dkk, (2005) peningkatan pH larutan dari 8 – 9 mengakibatkan efisiensi recovery fosfat sampai 80% dan terjadi penurunan ketika pH larutan diatas 10. Hal ini dikarenakan pada pH diatas 10 akan cenderung membentuk Mg(OH)₂ sehingga menurunkan ketersediaan ion Mg yang dapat menurunkan produktivitas pembentukan struvite kristal (Ariyantodkk, 2014).

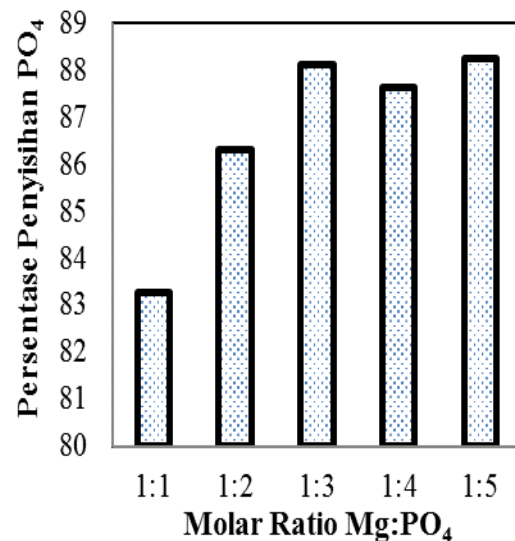
Pengaruh Rasio Reaktan

Mg:PO₄ Terhadap Persentase Penyisihan PO₄

Magnesium (Mg) adalah ion penyusun yang penting bagi pembentukan struvite kristal. Oleh karena itu, ion Mg juga dapat mempengaruhi tingkat kejenuhan larutan dan meningkatkan proses reaksi pembentukan struvite kristal. Dalam banyak kasus pembentukan struvite, penambahan ion Mg diperlukan untuk mempercepat reaksi pembentukan struvite yang secara teori perbandingan molar rasio reaktan Mg:N:P adalah 1:1:1. Konsentrasi ion Mg yang tinggi dapat meningkatkan reaksi penyisihan PO₄ dari larutan. Perbandingan molar reaktan PO₄ dan Mg ion adalah salah satu parameter yang dapat berpengaruh terhadap proses pembentukan struvite kristal. Pada pH tertentu, setiap peningkatan molar rasio reaktan Mg:PO₄ akan meningkatkan derajat kejenuhan terhadap

pembentukan struvite akan meningkatkan persentase penyisihan PO₄ didalam larutan (Capdevielle dkk, 2013).

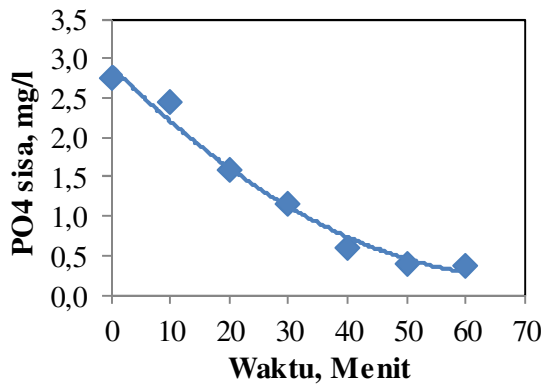
Gambar 3 menunjukkan efisiensi penyisihan PO₄ dapat dipengaruhi oleh rasio molar reaktan Mg:PO₄ pada pH larutan 9. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3 jika rasio molar reaktan Mg:PO₄ meningkat dari 1:1 sampai 1:3, persentase penyisihan PO₄ meningkat pesat sampai 88,12%, sedangkan kenaikan rasio molar lebih lanjut kisaran 1:4 sampai 1:5 dapat menyebabkan lambatnya peningkatan persentase penyisihan PO₄.



Gambar 3. Pengaruh Rasio molar reaktan Mg:PO₄ terhadap Persentase Penyisihan PO₄ pada pH 9

Kinetika Pembentukan Struvite

Limbah rumahsakit yang mengandung PO₄ dan NH₄ direaksikan dengan menambahkan larutan Mg dari MgCl₂.6H₂O didalam *aeration column crystallizer* dan laju penurunan konsentrasi PO₄ dalam larutan dipantau pada waktu 10, 20, 30, 40, 50, dan 60 menit. Setelah reaksi terjadi, proses kristalisasi struvite yang terbentuk antara ion PO₄, NH₄ dan Mg terjadi sampai keseimbangan tercapai. Seperti Gambar 4 menunjukkan proses kristalisasi terjadi sampai 50 menit. Setelah waktu ini, tidak ada perubahan yang cukup besar dalam proses kristalisasi. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa proses pembentukan struvite kristal mencapai titik kesetimbangan pada 50 menit.



Gambar 4. Kinetika Keseimbangan konsentrasi akhir PO_4 terhadap waktu pada proses Pembentukan Struvite

Kinetika pembentukan struvite kristal dianalisa dengan menggunakan permodelan kinetika *pseudo first order* dan *pseudo second order*. Persamaan kinetika pembentukan struvite kristal secara umum menggunakan pers (4.1) :

$$-dC / dt = k(C - C_e)^n \quad (3)$$

dimana k adalah konstanta laju reaksi, n adalah orde reaksi, C adalah konsentrasi reaktan terhadap waktu t , C_e konsentrasi reaktan pada kesetimbangan, dan $-dC / dt$ adalah perubahan laju penyisihan fosfat dari reaktan. Berepa peneliti sebelumnya menunjukkan bahwa kinetika *pseudo first order* adalah hasil yang terbaik dalam proses pembentukan struvite kristal (Nelson dkk, 2003, Quintana dkk, 2005, Rahaman dkk, 2008). Persamaan kinetika orde pertama sebagai berikut :

$$\ln (C_t - C_e) = -k_1 t + \ln (C_i - C_e) \quad (4)$$

Dimana C_t adalah konsentrasi reaktan terhadap waktu t , C_i adalah konsentrasi mula-mula, t adalah waktu reaksi dan k_1 adalah konstanta *pseudo first order*.

Demikian pula, persamaan kinetika *pseudo second order* dapat ditulis dalam persamaan sebagai berikut :

$$\frac{1}{(C_t - C_e)} = \frac{1}{(C_i - C_e)} + k_2 t \quad (5)$$

dimana k_2 adalah konstanta orde kedua. Suatu plot dari $\frac{1}{(C_t - C_e)}$ terhadap waktu memberikan garis lurus dengan slope k_2 .

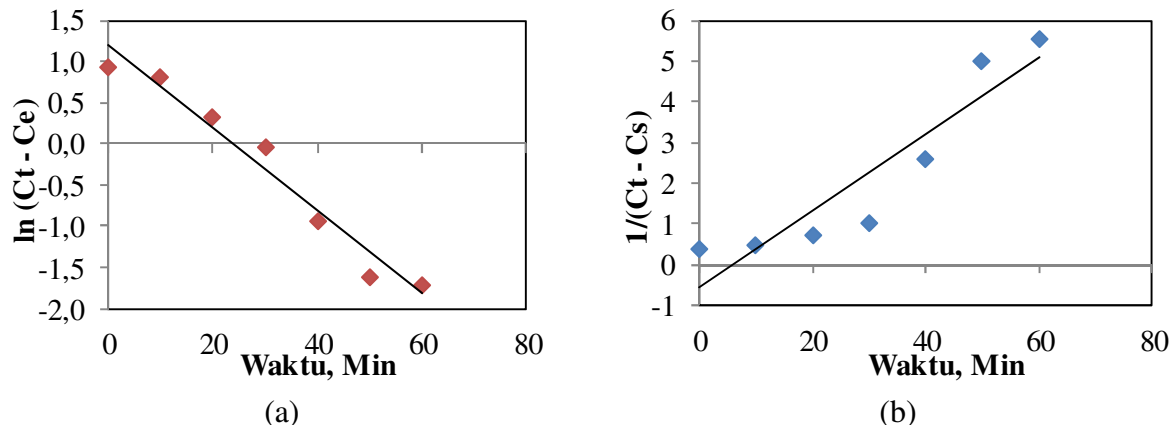
Gambar 5(a) adalah hasil plotting $\ln (C_t - C_e)$ terhadap t pada pers (4) yang digunakan untuk menghitung k_1 dan C_e . Secara detail perhitungan untuk *pseudofirstorder* dapat dilihat pada Tabel 1. Hasil plotting Pers.(4) menghasilkan sebuah garis lurus dengan nilai koefisien regresi linier (R^2) yaitu 0,96. Selain itu *pseudofirstorder* menghasilkan nilai kapasitas kesetimbangan konsentrasi (C_e) yang mendekati nilai eksperimen, $C_{e,exp}$. Nilai C_e , k_1 dan R^2 dapat dilihat dalam Tabel 1.

Gambar 5 (b) adalah garis lurus dengan plotting $1/(C_t - C_e)$ terhadap t pada pers (5). Secara detail perhitungan untuk *pseudosecondorder* dapat dilihat pada Tabel 1. Gambar 5 (b) diperoleh dari plot Pers (5) yang secara detail disajikan pada Tabel 1. Nilai koefisien regresi linier (R^2) pada Tabel 1 untuk *pseudosecondorder* sangat rendah (0,86) dan nilai $C_{e,cal}$ tidak mendekati nilai eksperimen, $C_{e,exp}$. Dari hasil analisa koefisien regresi linier (R^2) dapat disimpulkan bahwa *pseudofirstorder* kinetik memberikan korelasi yang baik untuk proses kristalisasi struvite dari air limbah. Hasil yang sama juga didapatkan dari beberapa penelitian sebelumnya (Nelson dkk, 2003, Quintana dkk, 2005, Rahaman dkk, 2008).

Konstanta kinetik *pseudo first order* (k_1) pada pH larutan 9 adalah 0,05/min. Konstanta kinetika kristalisasi struvite yang dihasilkan dalam penelitian yang dilakukan oleh Nelson et al., (2003) adalah 0,097/min. Nilai konstanta yang dihasilkan dalam penelitian ini lebih kecil, hal ini kemungkinan besar diakibatkan oleh tingkat kejenuhan konsentrasi PO_4 dan NH_4 yang berbeda.

Tabel 1 Kinetika Parameter Proses Kristalisasi Struvite

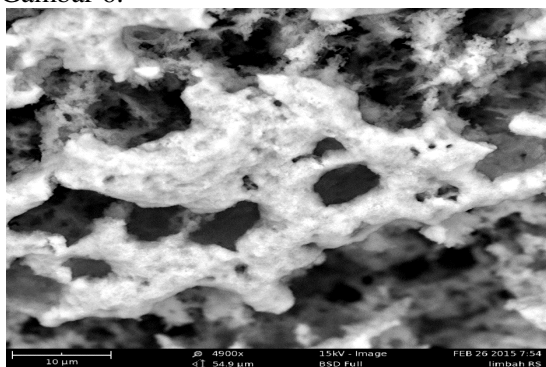
$C_{e,exp}$ (mg/l)	<i>Pseudo first orde model</i>			<i>Pseudo second orde model</i>		
	k_1 (1/min)	$C_{e,cal}$ (mg/l)	R^2	k_2	$C_{e,cal}$ (mg/l)	R^2
0,48	0,05	0,50	0,96	0,09	4,44	0,86



Gambar 5 Perbandingan kinetika model (a) kinetika *pseudo first order* dan (b) kinetika *pseudo second order* pada pH 9 dan rasio molar reaktan Mg:PO₄ 3:1 pada *Aeration Coloum Crystallizer*

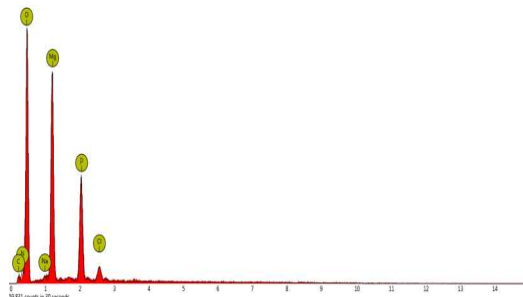
Karakteristik Produk Struvite Kristal

Karakteristik struvite kristal diamati dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Hasil pengamatan menggunakan SEM pada pH 9 dan rasio reaktan Mg:PO₄ 3:1 ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. SEM Struvite Kristal pada pH 9 dan Rasio molar reaktan Mg:PO₄ 3:1

Komposisi unsur kimia didalam kristal diamati dengan menggunakan EDS. Hasil analisa EDS menunjukkan hasil yang sama didapatkan peneliti sebelumnya (Le Core dkk, 2005). Hasil analisa dengan menggunakan EDS ini dapat dilihat pada Gambar 7.



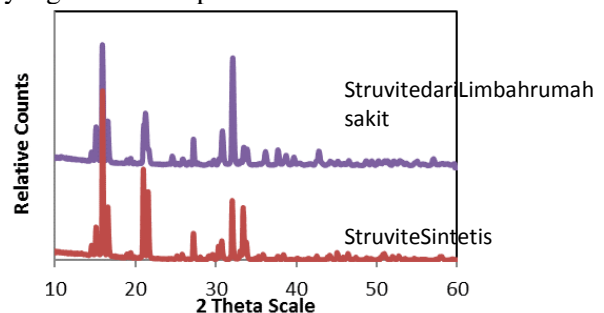
Gambar 7. Hasil analisa EDS

Gambar 7 menunjukkan bahwa puncak grafik magnesium lebih tinggi dari puncak grafik fosfor. Hasil analisa EDS dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Analisa EDS Kandungan Struvite Kristal

Element	Element Name	% Berat
O	Oksigen	52,2
Mg	Magnesium	20,6
P	Phospor	19,2
Cl	Chlorine	2,1
Si	Silicon	1,3
N	Nitrogen	2,8
C	Carbon	0,6
Na	Sodium	1,2
Total		100,00

Data XRD menggunakan kisi-kisi parameter $a = 11,215$, $b = 6,954$, $c = 6,141$ yang mengindikasikan bahwa struvite kristal pada kelompok phase tunggal (ortorombik). Pada Gambar 7, pola puncak garis menunjukkan bahwa struvite kristal ortorombik adalah fase kristal yang dominan dan tidak ada perbedaan pola puncak garis XRD antara struvite sintetis maupun struvite yang dihasilkan pada limbah rumah sakit.



Gambar 7 Analisis XRD struvite Kristal

SIMPULAN

Reaksi pembentukan struvite kristal terjadi pada pH basa diatas 7, semakin tinggi pH maka semakin banyak endapan struvite kristal. Hasil penelitian menunjukkan didapat nilai optimum pembentukan struvite kristal pada pH 9. Penelitian pembentukan struvite kristal dilakukan pada rasio perbandingan Mg:PO₄ pada 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, dan 1:5 menunjukkan terjadi peningkatan persentase penyisihan PO₄ didalam air limbah dan mencapai nilai optimum pada rasio 1:3.

Studi kinetika pada pH 9 dan rasio Mg:PO₄ menghasilkan struvite kristal presentasi penyisihan PO₄ sekitar 83% dari total PO₄ didalam air limbah. Proses kinetika keseimbangan reaksi terjadi pada menit ke 50. Pada penelitian ini kinetika keseimbangan pembentukan struvite kristal memberikan korelasi terbaik yaitu *kinetika pseudo first order*. Nilai konstanta k_1 adalah 0,05 /min

Pembentukan struvite kristal diamati dengan menggunakan SEM, EDS dan XRD menunjukkan bahwa struvite terbentuk selama proses kristalisasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Battistoni, P., Angelis, A. D., Pavan, P., Prisciandaro, M. & Cecchi, F. 2001. Phosphorus removal from a real anaerobic supernatant by struvite crystallization. *Water Research*, 35, 2167 - 2178.
- Battistoni, P., Boccadoro, R., Fatone, F. & Pavan, P. 2005. Auto-nucleation and kristal growth of struvite in a demonstrative fluidised bed reactor (FBR). *Environmental Technology*, 26, 975 - 982.
- Bhuiyan, M.I.H., D.S. Mavinic, and R.D. Beckie. 2008, Nucleation and growth kinetic of struvite in a fluidized bed reactor. *Journal of Crystal Growth*, 310(6): p. 1187 - 1194
- Capdevielle, A., Sýkorová, E., Biscans, B., Béline, F. & Daumer, M. L. 2013. Optimization of struvite precipitation in synthetic biologically treated swine wastewater determination of the optimal process parameters. *Journal of Hazardous Materials*, 244 - 245, 357 - 369.
- Ariyanto, E., H.M. Ang, and T.K. Sen, 2013, Impact of various physico-chemical parameters on spontaneous nucleation of struvite (MgNH₄PO₄·6H₂O) formation in a wastewater treatment plant: kinetic and nucleation mechanism. *Desalination and Water Treatment*, 1 - 12
- Ariyanto, E., T.K. Sen, and H.M. Ang, 2014, The influence of various physico-chemical process parameters on kinetics and growth mechanism of struvite crystallisation. *Advanced Powder Technology*, 25(2): p. 682-694.
- Le Corre, K. S., Valsami-Jones, E., Hobbs, P. & Parsons, S. A. 2005. Impact of calcium on struvite kristal size, shape and purity. *Journal of Kristal Growth*, 283, 514 - 522.
- Li, X. Z. & Zhao, Q. L. 2003. Recovery of ammonium-nitrogen from landfill leachate as a multi-nutrient fertilizer. *Ecological Engineering*, 20, 171-181.
- Nelson, N. O., Mikkelsen, R. L. & Hesterberg, D. L. 2003. Struvite precipitation in anaerobic swine lagoon liquid: effect of pH and Mg:P ratio and determination of rate constant. *Bioresource Technology*, 89, 229 – 236
- Ohlinger, K. N., Young, T. M. & Schroeder, E. D. 1998. Predicting struvite formation in digestion. *Water Research*, 32, 3607 - 3614
- Ohlinger, K. N., Young, T. M. & Schroeder, E. D. 1999. Kinetics effects on preferential struvite accumulation in wastewater. *Journal of Environmental Engineering*, 125, 730 - 737.
- Pastor, L., Mangin, D., Barat, R. & Seco, A. 2008. A pilot-scale study of struvite precipitation in a stirred tank reactor: Conditions influencing the process. *Bioresource Technology*, 99, 6285 – 691
- Quintana, M., Sanchez, E., Colmenarejo, M. F., Barrera, J., Garcia, G. & Borja, R. 2005. Kinetics of phosphorus removal and struvite formation by the utilization of by-product of magnesium oxide production. *Chemical Engineering Journal*, 111, 45 - 52
- Rahaman, M. S., Ellis, N. & Mavinic, D. S. 2008. Effects of various process parameters on struvite precipitation kinetics and subsequent determination

- of rate constants. *Water Science & Technology*, 57, 647 - 654.
- Shalaby, M.S., and S. El-Rafie, Struvite Precipitation and Phosphorous Removal from Urine Synthetic Solution: Reaction Kinetic Study. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 2014. 10 (1), 88-97
- Wang, J., Burken, J. G. & Zhang, X. J. 2006. Effect of seeding materials and mixing strength on struvite precipitation. *Water Environment Research*, 78, 125 - 132.